

液体噴流の微粒化促進と噴霧の方向制御

Enhanced Atomization of a Liquid Jet
and Control of its Spray Dispersion

玉木 伸茂, 清水 正則, 新井 雅隆, 廣安 博之
 (Nobushige TAMAKI) (Masanori SHIMIZU) (Masataka ARAI) (Hiroyuki HIROYASU)
 近畿大学 近畿大学 群馬大学 近畿大学
 (Kinki Univ.) (Kinki Univ.) (Gunma Univ.) (Kinki Univ.)

It has been clarified that the primary factor in atomization of the liquid jet was the disturbance of the liquid flow caused by cavitation. On the basis of this result, we proposed the new method of dispersion control of the spray. By using a nozzle which had an inclined plane of 45 degree at the inlet hole of the nozzle, it could be controlled that the occurrence of cavitation was localized at the one side of the nozzle hole. And it resulted the deviation of the spray. The effects of the position of the inclined plane on the internal flow in the nozzle hole, the disintegration behavior of the liquid jet, the breakup length and the spray angle were investigated on the relation of the localized position of cavitation. As the results, it was revealed that the liquid jet issued to the direction where cavitation occurred in the nozzle hole, and the disintegration of the liquid jet was considerably promoted.

Key Words : Atomization, Cavitation, Internal Flow, Liquid Jet, Dispersion of Spray, Enhanced Atomization

1. 緒言

ディーゼル機関に用いられている噴射ノズルは圧力霧化式であり、高い圧力で燃料を噴射して微粒化しなければ良好な噴霧は得られない。特に直接噴射式ディーゼル機関では、ノズルから噴射された燃料を微粒化させるために、非常に高い噴射圧力が要求されている。

そこで、低い噴射圧力で高圧噴射時と同程度の良好な噴霧が得られると、噴射ポンプも小型になり噴射系の小型軽量化が可能になるものと思われる。また、噴射ノズルの取り付け位置を変えることなく、燃焼室形状や機関の運転状況に応じて噴霧の噴出方向と分散状態を変えることができれば、燃焼特性の改善に有用であるものと思われる。

従来の研究において、ノズル噴孔内に発生するキャビテーションが、噴流の微粒化に大きく寄与しているということが報告されている^{(1)~(3)}。本報ではこの

結果をもとに、噴孔内の流動状態を大きく変化させるためにノズル噴孔入口部に45度の傾斜面を設け、1つのノズルでキャビテーションが発生しない領域とキャビテーションが発生する領域が存在するノズルを考案した。そして、このノズルを用いて噴霧の微粒化の促進と分散方向の制御を試みた。さらに、噴孔入口部に設けた傾斜面の位置を変化させて、傾斜面の位置が噴流の微粒化と噴霧の噴出方向に及ぼす影響についても調べた。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。タンク1内の水道水は、ポンプ2を用いてノズル6まで圧送され、圧力計5で噴射圧力を測定した後、大気圧雰囲気中に定常噴射した。噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動は、閃光時間3 μ sのマイクロフラッシュ9を用いて透過光撮影した。液柱の分裂長さは、スクリーン電極11を用いた電気抵抗法⁽⁴⁾により測定した。噴霧角は、図2に示すように、

噴孔出口から噴孔径Dの60倍の位置における噴霧の外縁と噴孔出口とのなす角 θ と定義した⁽⁵⁾。

図3に供試ノズルの概略を示す。供試ノズルは、噴孔内の流れが可視化できるようにアクリル樹脂で製作し、噴孔部側壁は平面に仕上げている。ノズルの種類は、噴孔入口付近で縮流が生じ易いシャープエッジタイプ（以下、Nozzle-Sと称す）と、Nozzle-Sの噴孔入口部に45度の傾斜面を有するもの（以下、Nozzle-Cと称す）である。噴孔径Dは3.0mm、噴孔管長と噴孔径との比L/Dは4で一定とし、噴孔入口部に設けた傾斜面の位置sは、0.5mmから3.0mmまで0.5mm間隔に変化させた。噴孔上流部の直径は、噴孔内の流れが噴孔上流部の流れの影響を受けないように十分大きくとるため50mmとした。

3. 実験結果および考察

3. 1 噴孔入口部に設けた傾斜面が噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動に及ぼす影響

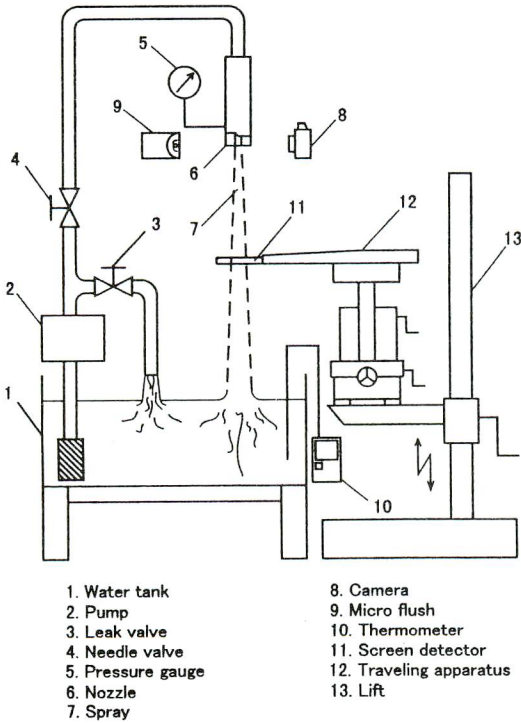


Fig.1 Experimental apparatus

図4に噴射差圧 ΔP_j を変化させた時のノズル噴孔内の流れと噴流の分裂挙動を示す。噴孔内は透過光で撮

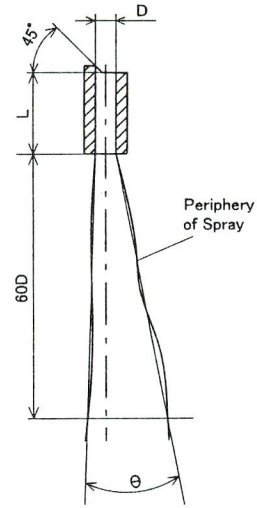
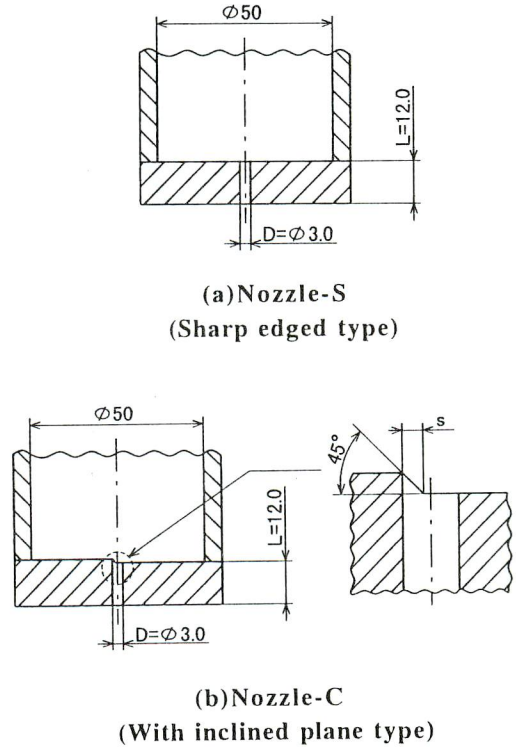


Fig.2 Definition of the spray angle



(a) Nozzle-S
(Sharp edged type)

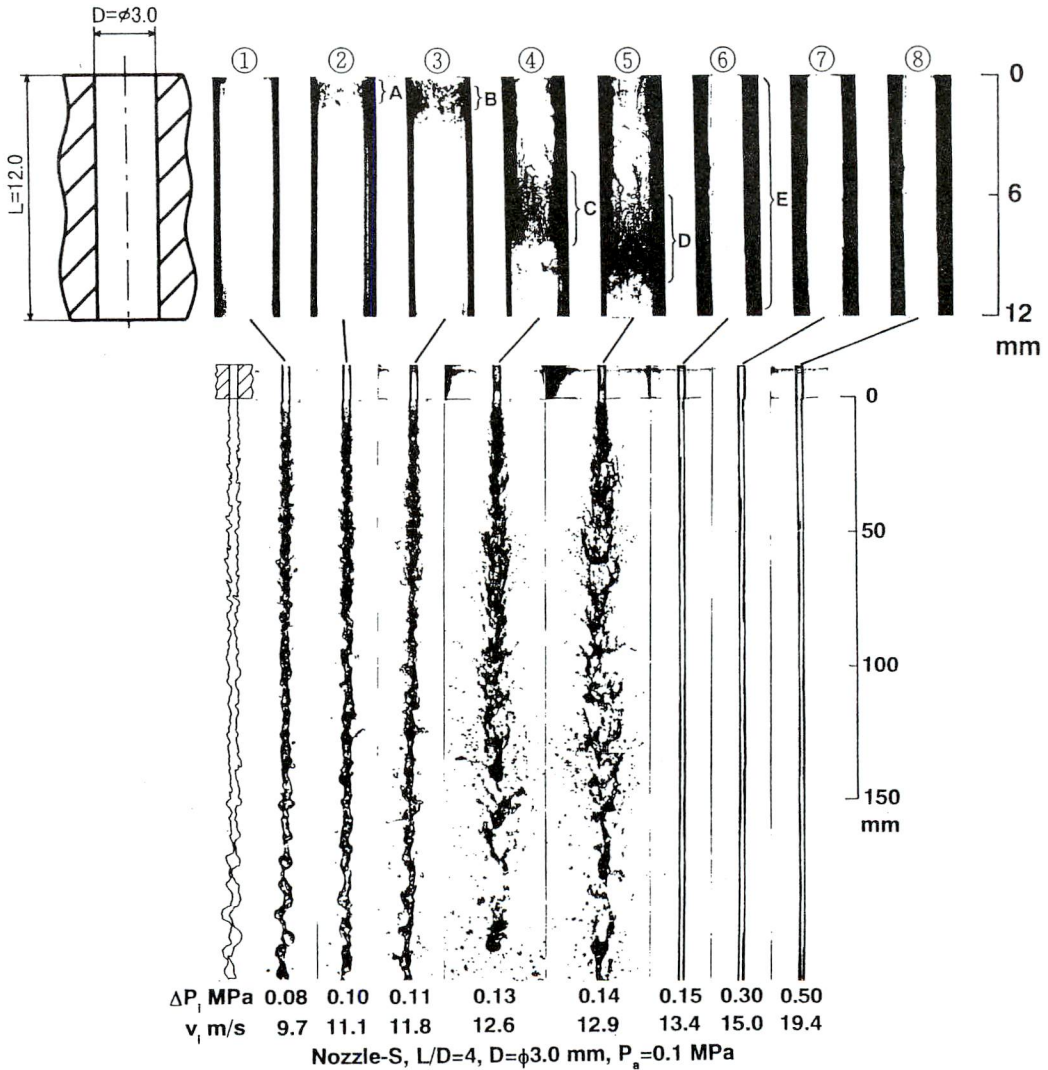
(b) Nozzle-C
(With inclined plane type)

Fig.3 Test nozzles

影しているため、噴孔内壁面、キャビティと液体との界面、キャビティの崩壊によって生成された微細な気泡で満たされている領域および噴孔内壁面から離れた液流表面と噴孔内壁面との空間が黒く写っている。図4(a)はNozzle-Sの場合、(b)はNozzle-C (s=3.0mm)の場合である。また、分裂長さや噴霧角を測定した結果を図5、6に示す。図5、6中の番号は図4と対応している。

図4(a)よりNozzle-Sの場合では、 ΔP_i を増加させていくと $\Delta P_i=0.10\text{MPa}$ で噴孔入口付近にキャビティの

初生が起き(図4(a)のA)、 $\Delta P_i=0.11\text{MPa}$ でキャビティの生成が肉眼で確認できるようになる(図4(a)のB)。さらに ΔP_i を増加させ $\Delta P_i=0.13\text{MPa}$ になると、噴孔入口付近で生成されたキャビティが噴孔管長の間付近で崩壊し、多数の微細な気泡が生じる(図4(a)のC)。この時、キャビティの崩壊に伴う攪乱が噴孔内の液流に生じ、噴流の微粒化が促進される。さらに ΔP_i を増加させ $\Delta P_i=0.14\text{MPa}$ になると、噴孔入口付近で生成されたキャビティが噴孔出口付近で崩壊するようにな

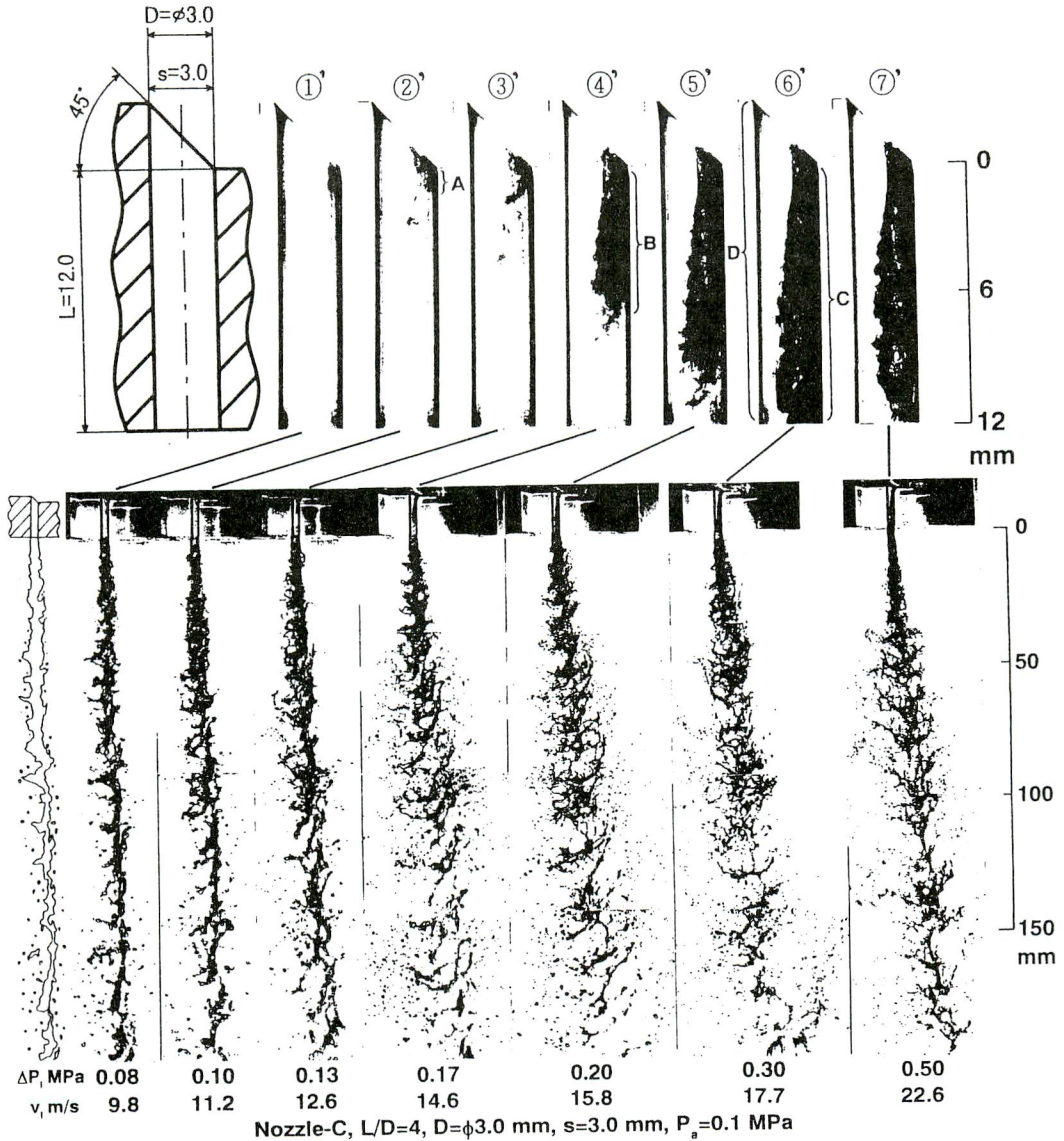


(a)Nozzle-S

Fig.4 Internal flow in the nozzle hole and disintegration behavior of liquid jets

り、多数の微細な気泡が生じる(図4(a)のD)。この時、噴流の微粒化がさらに促進され、図5に示す分裂長さは短くなり(図5の⑤)、図6に示す噴霧角は大きくなる(図6の⑤)。この後、 $\Delta P_j = 0.15 \text{ MPa}$ になると突然、液流が噴孔入口の内壁面から離れたまま噴孔外へ噴出するようになる(図4(a)のE)。この時、噴流

は微粒化しておらず、分裂長さは不連続に長くなり(図5の⑥)、噴霧角は不連続に小さく $\theta = 0 \text{ deg.}$ になる(図6の⑥)。この後 ΔP_j を増加させても分裂長さは長く、噴霧角は 0 deg. のまま変化は見られない。また、Nozzle-Sの場合では、分裂長さが不連続に長くなった後(図5の⑥)、 ΔP_j を減少させていくと、分裂長さ



(b) Nozzle-C ($s=3.0$ mm)

Fig.4 (Continued) Internal flow in the nozzle hole and disintegration behavior of liquid jets

は図5の⑥, ⑨, ⑩のように変化し, 分裂長さに履歴現象⁽⁶⁾が現れる.

これに対し, 図4(b)に示したNozzle-C ($s=3.0\text{mm}$) の場合では, ΔP_i を増加させていくと図4(b)向って右側の噴孔入口付近にキャビティの初生が起きる(図4(b)のA). さらに ΔP_i を増加させていくと, キャビティの崩壊に伴って生じた多数の微細な気泡が, 図4(b)向って右側の噴孔内に占めるようになる(図4(b)のB). これが噴孔出口付近まで達した時, 噴霧は噴孔内でキャビテーションが発生している方向へ大きく偏向し, 微粒化が促進されるようになる(図4(b)の⑤'). この時, 図5に示す分裂長さは短くなり(図5の⑤'), 図6に示す噴霧角は大きくなる(図6の⑤').

この後さらに ΔP_i を増加させても, Nozzle-Sの場合のように液流が噴孔内壁面から離れたまま噴出する現象は見られない. 噴孔内は, キャビテーションが発生している領域(図4(b)のC)と, 液体の領域(図4(b)の

D)が存在している. 噴霧は噴孔内でキャビテーションが発生している方向へ大きく偏向して噴出しており, 分裂長さは短く, 噴霧角は大きく, 噴流の微粒化は促進されている.

このように, 噴孔入口部に傾斜面を設けることにより, 噴霧を偏向させて噴出し, 微粒化を促進させることが可能である.

3. 2 噴孔入口部に設けた傾斜面の位置が噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動に及ぼす影響

図7に噴孔入口部に設けた傾斜面の位置 s を変化させた時の $\Delta P_i=0.5\text{MPa}$ における噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動を示し, 図8に噴孔内の流れと噴孔の任意断面における模式図を示す. 図8(a)はNozzle-S($s=0\text{mm}$), (b)はNozzle-Cで s が小さい場合($s=0.5\text{mm}$), (c)は s が大きい場合($s=2.5\text{mm}$)のものである. また, 図9に噴孔入口部に設けた傾斜面の位置 s が分裂長さと噴霧角に及ぼす影響を示す. なお, 図9中には先述したNozzle-S($s=0\text{mm}$)の結果を黒印で示してある.

図7, 図8(b)より s が小さい場合($s=0.5, s=1.0\text{mm}$ に相当), 液流は直角切断部の噴孔内壁面から離れたまま噴出するため噴流はほぼ鉛直下方に噴出し, ほとんど微粒化していない. この結果, 図9に示す分裂長さは長く, 噴霧角は小さい.

しかし, $s=1.5\text{mm}$ になると, 図7に示すように噴孔部向って右側の直角切断部を有する領域でキャビテーションが発生して, 液流が噴孔内壁面から離れたまま噴出する現象は見られなくなる. この時, 噴霧の偏向はそれほど顕著ではないが, s が小さいノズルよりも噴流の微粒化は促進されている.

さらに s が大きくなると($s=2.0\text{mm}$ 以上), 噴霧はキャビテーションが発生している方向に偏向して噴出し,

s が小さいノズルよりも微粒化が促進されるようになる. また, 図9より $s=2.0\text{mm}$ 以上のノズルにおいて分裂長さは短く, 噴霧角は大きくなっている.

このように, 噴孔入口部に設けた傾斜面の位置 s により, 噴孔内の流れと噴流の分裂挙動に大きな違いが見られる原因として, 次のようなことが考えられる.

噴孔入口部に傾斜面を設けた場合, 傾斜面から右斜め方向に流入する流れが噴孔入口付近に存在しているものと考えられる. 図8(b)より噴孔入口部に占める傾斜面の位置 s が小さい場合では, 傾斜面から右斜め方向に流入する流れよりも直角切断面から流入する流れが多いため, 直角切断面から流入する流れが支配的になる. そのため, Nozzle-Sと同じように液流が噴孔内

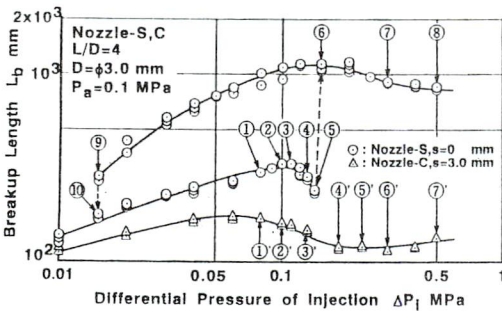


Fig.5 Effect of the inclined plane at the inlet of the nozzle hole on the breakup length

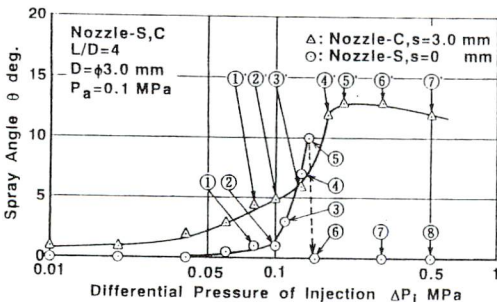


Fig.6 Effect of the inclined plane at the inlet of the nozzle hole on the spray angle

壁面から離れたまま鉛直下方に噴出し、噴孔内にキャビテーションが発生しないものと考えられる。したがってsが小さい場合では、噴孔入口部に設けた傾斜面から流入する流れが噴流の微粒化と噴出方向にほとんど影響しないものと考えられる。

一方、図8(c)より噴孔入口部に占める傾斜面の位置sが大きくなると、直角切断面から流入する流れよりも傾斜面から流入する流れが多くなる。そのため、図8(c)に示すノズル噴孔出口付近における流れは、噴射軸方向に対して右斜め方向の流れが生じているものと考え

られる。このようにsが大きくなると、傾斜面から流入する流れがキャビテーションを伴っている流れを噴孔部右側に偏らせるため、噴霧はキャビテーションが発生している方向へ偏向して噴出するものと考えられる。

以上のことから、噴流の微粒化に寄与するキャビテーションが噴孔内に発生するように直角切断面を設け、かつ噴霧の噴出方向に影響すると思われる噴孔入口部の傾斜面の位置sを大きく取ることにより、噴流の微粒化を促進させ、噴霧を大きく偏向させることが可能である。

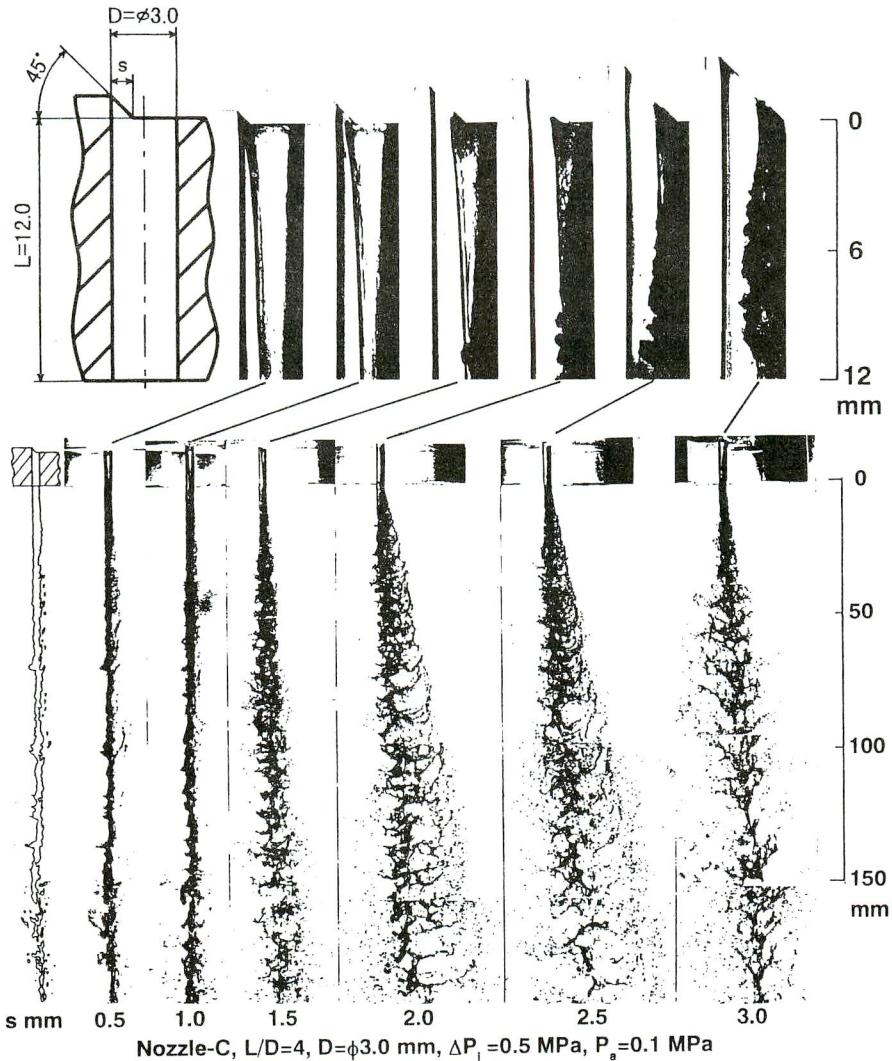


Fig.7 Internal flow in the nozzle hole and disintegration behavior of liquid jets (Effects of the position of the inclined plane)

4. 結言

ノズル噴孔入口部に45度の傾斜面を設けたノズルを用い、噴流の微粒化促進と噴霧の分散方向の制御を試みた。さらに、噴孔入口部に設けた傾斜面の位置sを変化させて、傾斜面の位置が噴流の微粒化と噴出方向に及ぼす影響について調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) シャープエッジノズル(Nozzle-S)の場合、噴流は鉛直下方に噴出し、分裂長さは長く、噴霧角は小さくなり噴流は微粒化しない。
- (2) 噴孔入口部の傾斜面の位置sが小さい場合 ($s=0.5$, $s=1.0$ mm), 噴流はほぼ鉛直下方に噴出し、ほとんど微粒化しない。
- (3) 噴孔入口部の傾斜面の位置sが大きい場合 ($s=2.0$ mm以上), 噴霧は直角切断面を有する方向へ偏向して噴出し、sが小さいノズルよりも分裂長さは短く、噴霧角は大きくなり微粒化が促進される。

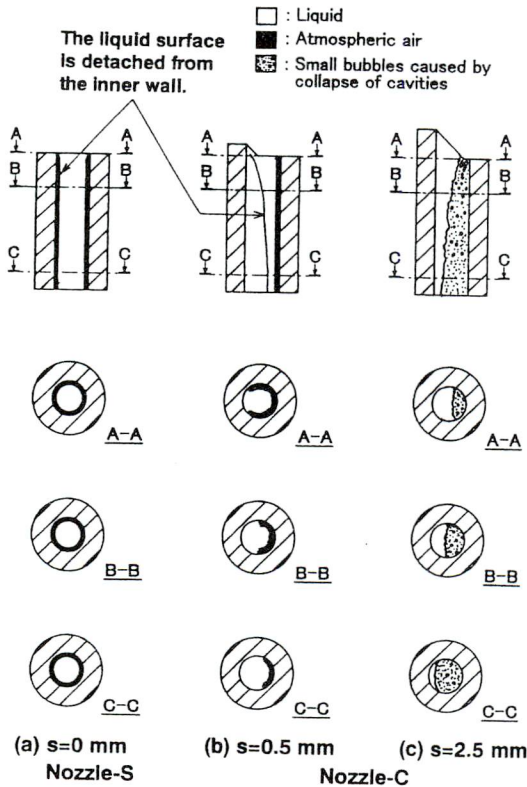


Fig.8 Schematic of the behavior of liquid flow in the nozzle hole

参考文献

- (1) 清水正則・新井雅隆・廣安博之：液体噴流の微粒化過程とノズル内の流れ，機論B, 56-528(1990), 2519-2525.
- (2) H. Hiroyasu, M. Arai and M. Shimizu: Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, Proc. ICLASS-91(1991), 275-282.
- (3) 玉木伸茂・西田恵哉・清水正則・廣安博之：液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響(第2報, ノズルの幾何学形状および雰囲気圧力の影響), 微粒化, Vol. 5-3, No.11(1996), 3-11.
- (4) 清水正則・新井雅隆・廣安博之：高速噴流の分裂長さの測定, 機論B, 49-448(1983), 2886-2892.
- (5) 清水正則・新井雅隆・廣安博之：高速噴流の分裂長さおよび噴霧角, 機論B, 51-461, (1985), 257-264.
- (6) 清水正則・新井雅隆・廣安博之：高速液体噴流の分裂過程, 機論B, 54-504, (1988), 2236-2244.

謝辞

本研究を遂行するにあたり実験に協力された、香川健仁(近畿大学大学院生), 世良和也, 吉田 収(近畿大学学部生) 諸氏に謝意を表す。

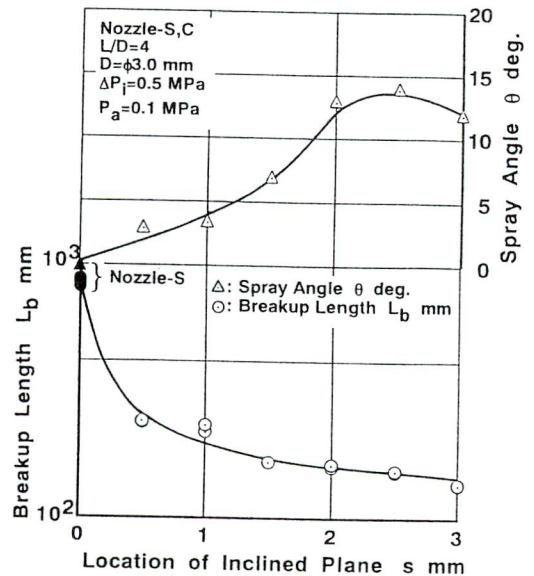


Fig.9 Effects of the position of the inclined plane on the breakup length and the spray angle



玉木 伸茂
近畿大学・工学部・助手
〒737-0112
広島県呉市広古新聞5-1-3
Tel.(0823)71-9171 (内216)
Fax.(0823)74-5133
略歴：1996年 広島大学大学院工学研究科博士課程修了。

液体噴流の微粒化機構，ディーゼル噴霧，噴霧燃焼に関する研究に従事。



新井 雅隆
群馬大学・工学部・教授
〒376-8515
群馬県桐生市天神町1-5-1
Tel.(0277)30-1522
Fax.(0277)30-1521
略歴：1977年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了。

主として，微粒化機構，ディーゼル噴霧，低重力・高重力場での熱伝達，高温燃焼に関する研究に従事。



清水 正則
近畿大学・工学部・教授
〒737-0112
広島県呉市広古新聞5-1-3
Tel.(0823)71-9171 (内261)
Fax.(0823)74-5133
略歴：1965年 近畿大学工学部機械工学科卒業。

主として，液体噴流の微粒化機構，ディーゼル噴霧，噴霧燃焼，噴霧冷却に関する研究に従事。



廣安 博之
近畿大学・工学部・教授
〒739-2116
広島県東広島市高屋うめの辺1
Tel.(0824)34-7000
Fax.(0824)34-7011
略歴：1962年 東北大学大学院博士課程修了後，(株)豊田中央研究所を経て，1969年より広島大学教授，1997年広島大学名誉教授。

主として，内燃機関の燃焼，噴霧燃焼に関する研究に従事。